بررسی اثر زئولیت و سیمان بر تراکم خاک ماسه‌ای بابلسر*

عیسی شوش پاشا [(۱)] مجتبی عباسی [(۲)] حسین ملاعباسی [(۳)]

چکیده *ماسه‌های سیمانی به‌عنوان یکی از موضوعات اقتصادی و زیست‌محیطی در تثبیت خاک شناخته‌شده است. در برخی موارد ترکیبی از سیمان و ماسه با سایر مواد ازجمله فیبر، شیشه، نانوذرات و یا زئولیت می‌تواند به‌طور مؤثر در تثبیت خاک در جاده‌سازی استفاده شود. در این بررسی زئولیت به‌عنوان یکی از مواد پوزلان افزودنی به سیمان و اثرات آن بر تراکم مورد ارزیابی قرارگرفته است. در این راستا از زئولیت نوع معدنی کلینوپیلولیت و سیمان تیپ II نکا و ماسهٔ بابلسر به‌عنوان خاک پایه استفاده شد. آزمایش تراکم استاندارد برروی طرح اختلاط ۲٤ حالت سیمان و زئولیت شامل درصد سیمان‌های مختلف ۲، ٤، ٦ و ۸ درصد وزن خشک کل نمونه و درصدهای جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ زئولیت با سیمان انجام شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد با جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان، وزن مخصوص خشک حداکثر آن نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت به میزان ۲ تا ۲/۵درصد کاهش می‌یابد و درصد رطوبت بهینه تقریباً ۱٤ درصد به‌دست آمده است. درانتها یک تابع براساس سری ولترا برای ارتباط دادن وزن مخصوص خشک حداکثر به پارامترهای ماسه زئولیت سیمانی ارائه‌شده است.*

واژه‌های کلیدی تثبیت، سیمان، زئولیت، تراکم، رطوبت بهینه.

Investigation of Zeolite and Cement on Compaction of Babolsar Sand

I. Shooshpasha M. Abbasi H. MolaAbasi

Abstract *It is widely known and well emphasized that the cemented sand is one of economic and environmental topics in soil stabilization. In some instances, a blend of sand, cement and other materials such as fiber, glass, nano particle and zeolite can commercially available and effectively used in soil stabilization in road construction. In this investigation, zeolite and its effect on compaction studied as one of pozelan additive material to cement. Therefore, cilinopiolite kind of zeolite, Neka cement type II and Babolsar sand are used. Compaction poroctor tests were carried out on 24 combination type of cement and zeolite with include different cement percentages 2, 4, 6 and 8 percent of total dry weight of samples and replacement percent's of 0, 10, 30, 50, 70 and 90 cement with zeolite. Results show that by replacement cement material by zeolite, the maximum dry density increased 2 to 2.5% in comparison with cemented samples and 14% optimum water content approximately concluded. At the end, a function fits Based on Voltra series presented to relate maximum dry density and zeolite-cement-soil parameters.*

Key Words Stabilization, Cement, Zeolite, Compaction, Optimum Water Content.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۱۰/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۲/۱ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران و خاک و پی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل. Email: shooshpasha@nit.ac.ir

(۲) کارشناس ارشد خاک و پی، مؤسسهٔ آموزش عالی غیرانتفاعی صنعتی، مازندران.

(۳) دانشجوی دکتری، مهندسی خاک و پی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

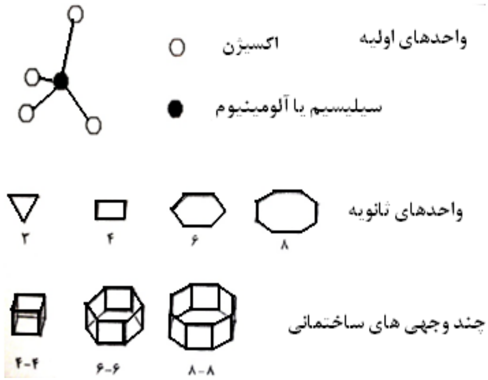
مقدمه

از ویژگی‌های عمدهٔ خاک‌های ماسه‌ای سست، مقاومت ضعیف و ناپایداری حجمی آنها می‌باشد. برای تثبیت این نوع خاک‌ها استفاده از تکنیک افزودن سیمان به‌عنوان یکی از گزینه‌های پرکاربرد مورد استفاده مهندسان می‌باشد [1].

سیمان که از یک‌سو انرژی فراوانی برای تولید آن مصرف می‌شود و از سوی دیگر موجب تولید حدود ۸ درصد گازکربنیک تولیدشده در جهان می‌شود، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. بنابراین بهینه‌سازی ترکیب آن به‌گونه‌ای که کمترین میزان انرژی برای تولید آن مصرف شود و کمترین لطمه به منابع طبیعی وارد شود و درنهایت بهترین کارآیی ممکن از آن گرفته شود، به‌عنوان یک هدف اصلی مطرح می‌گردد [2].

برخی از مطالعات به استفاده از فیبر، خرده‌لاستیک، نانو ذرات و شیشه در ماسهٔ سیمانی در راستای افزایش مقاومت و کاهش رفتار ترد ماسهٔ سیمانی اشاره کرده‌اند. در بررسی ادبیات فنی، کمتر به افزودن مادهٔ پوزلانی ازجمله زئولیت به ماسهٔ سیمانی پرداخته شده است. استفاده از زئولیت به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی می‌تواند گزینه‌ای درخور توجه برای کاهش مصرف سیمان باشد.

زئولیت یک واژهٔ یونانی می‌باشد که از دو جزء به معنی سنگ و جوشان تشکیل شده است و اولین بار در سال ۱۹۷٦ توسط یک معدن‌شناس سوئدی به نام کرونستت، نام زئولیت به کانی استیلبیت داده شد که به‌هنگام حرارت دادن مقدار زیادی آب از آن خارج می‌گردید. از دست دادن آب در زئولیت‌ها، آسان و برگشت‌پذیر است. زئولیت‌ها شامل فلزات قلیایی و قلیایی خاکی هستند و قادرند در واکنش‌های جایگزینی برگشت‌پذیر شرکت نمایند. تجزیه‌های شیمیایی و ساختاری نشان می‌دهند که زئولیت‌ها عمدتاً حاوی سیلیسیم، آلومینیوم و اکسیژن هستند (شکل ۱). زئولیت‌ها جامداتی بلورین و آبدار با روزنه‌هایی متحدالشکل و به ابعاد ۳ تا ۱۰ انگستروم می‌باشند که ابعاد مزبور در حد اندازه‌های مولکولی است، لذا به زئولیت‌ها غربال‌های مولکولی نیز می‌گویند [۳].



شکل ۱ نمایش واحدهای ساختمانی در ساختار مولکولی زئولیت

سال‌های زیادی از فراگیر شدن استفاده از زئولیت در جهان بالاخص کشورهای صنعتی و پیشرفته می‌گذرد. لیکن از نظر هزینه و امکان دسترسی، تهیهٔ این کانی‌ها در ایران بسیار ارزان و به‌راحتی میسر است. به‌همین دلیل استفاده از آنها علاوه بر کاهش معضلات زیست‌محیطی از نظر اقتصادی نیز بسیار اثرگذار است [4].

استفاده از زئولیت به‌عنوان یک مادهٔ معدنی طبیعی و ارزان (در ایران) و جایگزینی آن با درصدی از سیمان می‌تواند برای به‌سازی ماسه با سیمان مناسب باشد. ارزان بودن زئولیت نسبت به سیمان را با توجه به آنالیز بهای جهانی و وجود معادن بسیار در کشور به‌ویژه در استان سمنان [4] می‌توان به‌عنوان بخشی از دلایل کاربرد زئولیت به‌جای سیمان نام برد.

این مقاله شامل مطالعات قبلی اثرات سیمان و زئولیت بر تراکم، مواد و روش‌های آزمایش (مشخصات مصالح شامل دانه‌بندی، وزن مخصوص بیشینه و کمینه و تراکم پروکتور) و درانتها بحث و نتایج این بررسی می‌باشد.

اثرات سیمان و زئولیت بر تراکم

افزودن سیمان به خاک موجب تغییر در وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه می‌شود، ولی محققان درمورد چگونگی و میزان این تغییرات نظرات متفاوتی را ارائه نموده‌اند. کمیتهٔ تخصصی ACI بیان می‌دارد که تثبیت با سیمان باعث تغییر در وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه می‌شود، اما این تغییرات قابل پیش‌بینی نیستند [5]. برای تثبیت موفقیت‌آمیز، تراکم کافی ضروری است ولی نکته مهمی که در تراکم می‌بایست به آن توجه داشت این است که تأخیر بین اختلاط و متراکم کردن می‌تواند حداکثر دانسیته را کاهش دهد.

کایا و دوروکان در سال ۲۰۰٤ مشخصات تراکمی زئولیت و مخلوط زئولیت – بنتونیت (BEZ) (Bentonite-Embedded Zeolite) را مورد ارزیابی قرار دادند. با افزایش مقدار بنتونیت در مخلوط، وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد و این در حالی است که درصد رطوبت بهینه افزایش یافته است. البته با افزودن مقادیر مختلف بنتونیت، کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه چشمگیر نمی‌باشد [6].

صرف زمان زیاد برای اختلاط باعث وقوع هیدراسیون جزئی سیمان می‌شود که نتیجهٔ آن کاهش مقاومت در دانسیتهٔ ثابت است. اگر عمل تراکم به تأخیر بیافتد سیمان شروع به عمل هیدراسیون می‌کند و موجب سفت شدن خاک تثبیت‌شده می‌گردد و درنهایت عمل تراکم را مشکل می‌نماید [5]. تأخیر بین اختلاط و تراکم به کاهش قابل ملاحظه در مقاومت فشاری محصورنشدهٔ مصالح تثبیت‌شده با سیمان می‌انجامد. وایت و گنانندران در سال ۲۰۰۵ گزارش کردند که ٤ تا ۲٤ ساعت تأخیر بین اختلاط و عمل تراکم به‌ترتیب موجب ۱۰ تا ۲۰ و ٤۰ درصد کاهش در مقاومت فشاری محصورنشده می‌گردد [7].

زابیلسکا در سال ۲۰۰۸ در مطالعه‌ای تأثیر میزان سیمان و نوع روش انتخابی برای انجام آزمایش تراکم را بر دانسیته و درصد رطوبت بهینه مورد ارزیابی قرار داد. آنها نتیجه گرفتند که ارتباط مستقیمی که بین عمل هیدراسیون و میزان سیمان وجود دارد؛ به‌عبارت دیگر با افزایش میزان سیمان، عمل هیدراسیون که منجر به کاهش رطوبت می‌شود، نیز افزایش می‌یابد [8].

دانسیتهٔ خاک به جنس خاک، انرژی تراکم و میزان شاخص تثبیت بستگی دارد. در این ارتباط الاقباری و همکارانش در سال ۲۰۰۹ تأثیر دو شاخص تثبیت مختلف را در منحنی تراکم خاک ماسه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند. شاخص‌های تثبیت مورد استفاده شامل سیمان پرتلند معمولی و گرد کورهٔ سیمان می‌شدند [9]. آنها دریافتند که با افزایش میزان سیمان دانسیتهٔ خاک افزایش پیدا می‌کند. دلیل این مطلب را می‌توان به دو عامل زیر نسبت داد:

۱. از آن‌جایی که سیمان دارای مصالح ریزدانه‌تری نسبت به ماسه است، این مواد فضای خالی بین ذرات ماسه را پر می‌کند و باعث افزایش وزن مخصوص خشک خاک می‌شود.
۲. بالاتر بودن وزن مخصوص دانه‌های سیمان(Gs) نسبت به ماسه.

پس در حالت کلی می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که افزایش سیمان باعث افزایش وزن مخصوص خشک خاک می‌شود که مقدار این افزایش به نوع و میزان سیمان بستگی خواهد داشت. نکتهٔ مهم دیگر این است که افزایش سیمان منجر به‌کاهش رطوبت بهینه می‌شود و این کاهش رطوبت برای درصد سیمان‌های بالا محسوس‌تر است.

میتریوس و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی اثر جایگزینی زئولیت طبیعی نوع HEU به‌جای ماسه در ساخت ملات سبک پرداخته‌اند. نتایج بررسی‌های آنان نشان می‌دهد که اضافه کردن زئولیت طبیعی به مخلوط ملات ماسه و سیمان پرتلند سبب کاهش تا ۱۸/۵ درصدی وزن مخصوص آن می‌شود. افزایش نسبت

زئولیت طبیعی افزایش تخلخل و افزایش جذب آب ملات و در برخی موارد کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری را سبب می‌شود [10].

هوانگ در سال ۲۰۱۵ به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی اختلاط‌های ماسه و زئولیت، با درصد جرم‌های مختلف زئولیت ۲۵، ۵۰، ۷۵٪ پرداخته است. نتیجهٔ بررسی ایشان در مورد تراکم نشان داد که با افزایش نسبت جرم زئولیت در مخلوط، درصد رطوبت بهینه تمایل به افزایش و وزن مخصوص خشک ماکزیمم تمایل به کاهش دارد [11].

یلماز و همکاران [12] نیز به بررسی خواص مکانیکی و شیمیایی مخلوط‌های زئولیت و ماسه پرداخته‌اند.

در این تحقیق به بررسی زئولیت به‌عنوان یک مادهٔ پوزلان افزودنی و اثرات آن بر تراکم خاک‌های ماسه‌ای بابلسر تثبیت شده با سیمان پرداخته شده است. در این بررسی یک‌سری آزمایش انجام شده است که در ادامه به آنها اشاره شده است.

برنامهٔ آزمایشگاهی

برای مطالعهٔ اثرات زئولیت و سیمان بر تراکم ماسهٔ بابلسر پارامترهای مقدار سیمان و جایگزینی آن با زئولیت مدنظر قرار گرفته است. در جدول (۱) متغیرهای مربوط به آزمایش تراکم استاندارد ارائه شده است.

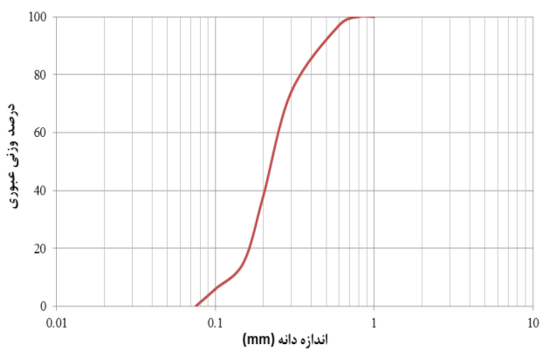
جدول ۱ مشخصات متغیرهای ملاحظه شده

متغیرها	تعداد سطوح	توضیحات
نوع خاک پایه	۱	ماسهٔ بددانه‌بندی‌شدهٔ بابلسر
نوع سیمان	۱	سیمان پرتلند تیپ II نکا
مقادیر سیمان	٤	۲، ٤، ٦ و ۸ درصد وزن خشک کل
نوع زئولیت	۱	زئولیت طبیعی کلینیوپیولیت
مقادیر زئولیت	٦	۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد سیمان

مصالح مورد استفاده

مصالح به‌کارگیری‌شده در این تحقیق شامل خاک ماسه‌ای بابلسر، سیمان پرتلند تیپ II نکا و زئولیت سمنان می‌باشد. در انتخاب مصالح مورد آزمایش سعی شده است که مصالح برای تثبیت خاک‌های نوار ساحلی شمال کشور مناسب باشد.

ماسه. باتوجه به نهشته‌های ماسه‌ای فراوان در سواحل دریای خزر در این پژوهش از ماسهٔ ساحلی بابلسر استفاده شده است. ماسهٔ بابلسر از نوع ماسهٔ بد دانه‌بندی‌شده است که اندازهٔ متوسط دانه‌های آن حدوداً ۰/۲٤ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM-C136 [13] می‌باشد (شکل ۱). وزن مخصوص خشک بیشینه و کمینهٔ ماسهٔ بابلسر به‌ترتیب مقادیر ۱/۷۷ و ۱/٤۹ تن بر مترمکعب ASTM-D4253-4 [14,15] و چگالی دانه‌های جامد آن ۲/۷۲ مطابق با استاندارد ASTM-D854-92 [16] به‌دست آمده است. علت بالا بودن چگالی دانه‌های جامد، وجود درصدی از مصالح اکسید آهن و سایر مصالحی چون نیکل و کبالت است [۱۷].



شکل ۲ منحنی دانه بندی ماسه بابلسر

زئولیت. زئولیت مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت است که از معدنی واقع در ۳۰ کیلومتری شمال سمنان استخراج شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۱) آمده است [4]:

جدول ۲ مشخصات مکانیکی زئولیت معدنی [9]

مشخصات	زئولیت
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۱/۱۹
سطح ویژه (cm^2/gr)	۱۰۰۰
جذب آب	٦٠ درصد حجمی
ظرفیت تبادل یونی (gr/meq)	۲/٦
چگالی دانه‌های جامد	۲/۲

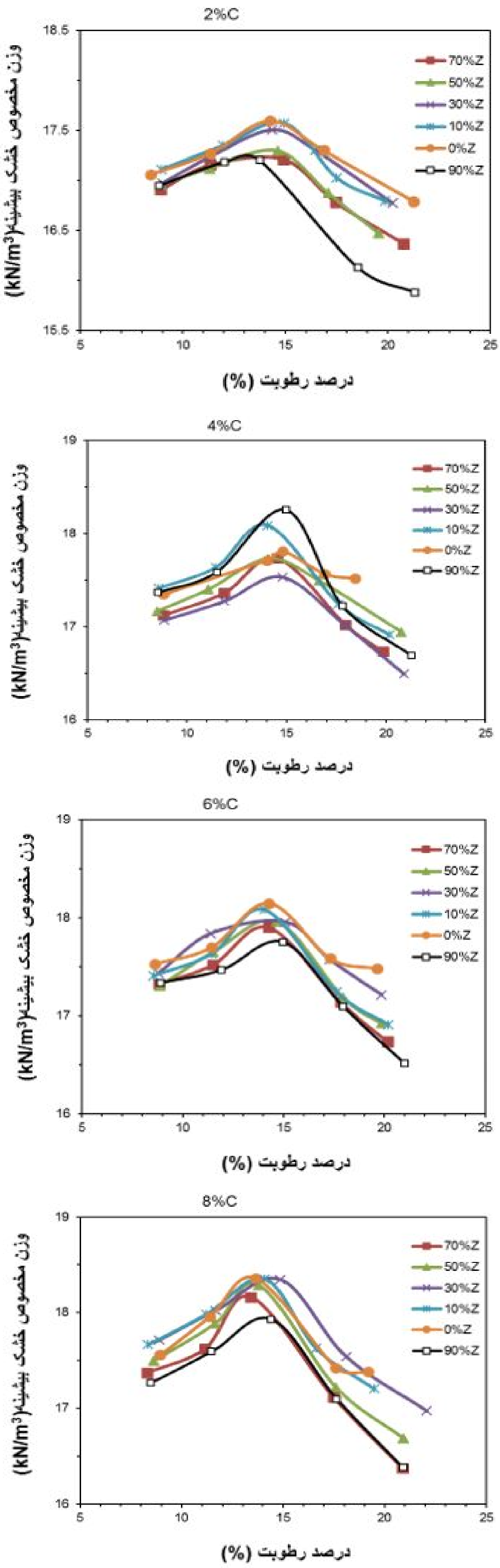
سیمان. در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان نکا واقع در استان مازندران استفاده شده است. مصرف ویژهٔ این سیمان در محل‌هایی است که حرارت هیدراسیون متوسط برای آنها ضرورت دارد و حملهٔ سولفات‌ها به آنها در حد متوسط می‌باشد.

روند آزمایش تراکم

آماده‌سازی نمونه در اسرع وقت پس از اتمام مخلوط و آزمایش براساس استاندارد D 698 -07E1 انجام شد [18]. در هر طرح، در مجموع پنج نمونه برای به‌دست آوردن رطوبت مطلوب برای تراکم استفاده گردید. مقادیر مختلف ماسه، سیمان و زئولیت خشک‌شده در گرم‌خانه براساس درصدهای بیان‌شده برای هر نمونه جمعاً به میزان ۳کیلوگرم جدا شد و با رطوبت نسبتاً کم مخلوط شد و مخلوط در قالب پروکتور استاندارد بااستفاده از چکش با سقوط آزاد متراکم شد. تراکم در ۳ لایه، هر لایه با ۲۵ ضربهٔ متراکم و سطح خاک روی قالب بدون اعمال فشار صاف شد. پایه برداشته شد و خاک و قالب وزن شدند. نمونه رطوبت از بالا، وسط و پایین از خاک گرفته شد. این روش تا زمانی که وزن خاک در قالب از حداکثر مقدار عبور و شروع به کاهش می‌کند تکرار شد.

نتایج

با انجام آزمایش‌های تراکم استاندارد برای هر ۲٤ حالت طرح اختلاط درصد رطوبت و حداکثر وزن مخصوص خشک حاصل شد. نتایج به‌صورت شکل‌های ذیل می‌باشد.

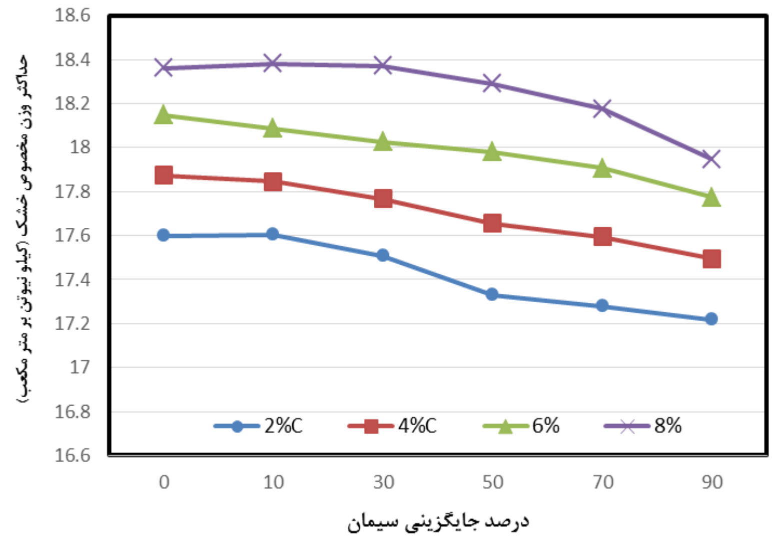


شکل ۳ تراکم طرح‌های مختلف جایگزینی با سیمان

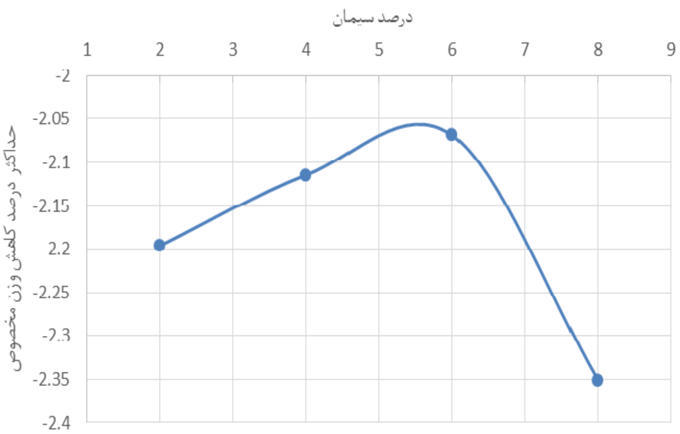
به‌طور خلاصه نتایج حداکثر تراکم برای طرح‌های اختلاط در شکل (٤) ارائه شده است.

با توجه به شکل (٤) با افزایش میزان جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان، وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌ها کاهش می‌یابد که میزان این کاهش در طرح ۲٪ سیمان ۱/۲ درصد و در طرح ۸٪ سیمان ۲ درصد می‌باشد. این در حالی است که درصد رطوبت بهینهٔ نمونه در کلیهٔ اختلاط‌ها تقریباً ١٤٪ بوده است.

برای توجیه استفاده از زئولیت به‌جای سیمان، تغییرات آن به‌صورت درصد در شکل (٥) نشان داده شده است. همان‌طوری که در شکل (٥) دیده می‌شود حداکثر کاهش۲/۵ درصدی وزن مخصوص خشک حداکثر برای جایگزینی سیمان با زئولیت دیده می‌شود که باتوجه به قیمت و مزایای زیست محیطی زئولیت نسبت به سیمان لزوم استفاده از زئولیت را نشان می‌دهد.



شکل ٤ نتایج کلی تراکم بااستفاده از درصدهای مختلف جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان



شکل ٥ حداکثر تغییرات تراکم بیشینهٔ نمونه‌های مورد آزمایش

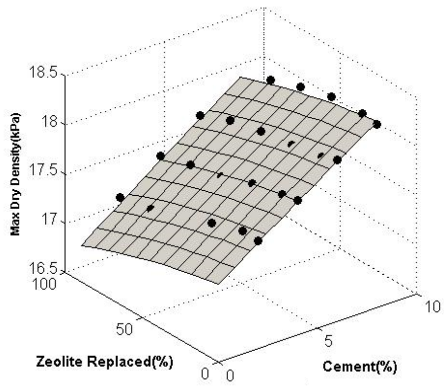
باتوجه به مطالب بالا و استفاده از رگرسیون خطی و سری ولترا (رابطهٔ ۱) فرمولی برای تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک و مقادیر سیمان و درصدهای جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان به‌صورت رابطهٔ (۲) ارائه شده است که بااستفاده از آن و داشتن وزن مخصوص خشک مورد نیاز مهندسان و شرایط خاص هر پروژه درصدهای سیمان و زئولیت قابل تعیین است.

سری ولترا:

$$Y=a_1+a_2X_1+a_3X_2+a_4X_1^2+a_5X_2^2+a_6X_1X_2 \quad (1)$$

$$\gamma(kN/m^2)=17.3+0.144C-.003Z-.0009c^2-0.00002Z^2+0.00008CZ \quad (2)$$

که در آن C و Z به‌ترتیب درصد سیمان و جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان می‌باشد. در نمایی دیگر می‌توان شکل (٦) را ارائه داد که کفایت مدل را اثبات می‌کند. ضمناً فرمول به‌دست آمده از دقت خیلی خوبی (R^2=0.99) برخوردار است.



شکل ٦ درون‌یابی‌حداکثر دانسیته با درصد سیمان و جایگزینی‌ها

بحث و تجزیه تحلیل نتایج

زئولیت در مقایسه با سیمان در محیط‌های خورنده پایداری بیشتری نسبت به سیمان دارد و سبب هیدراسیون آرام سیمان با حرارت‌زایی کمتر می‌شود.

در بررسی نتایج آزمون تراکم برروی نمونه‌هایی که در آنها فقط از سیمان استفاده شده است مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سیمان تقریباً با ثابت بودن رطوبت بهینه در ١٤٪ ،حداکثر تراکم خشک نمونه‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این مطلب را می‌توان ریزتر بودن سیمان نسبت به ماسه و پرکردن فضای خالی بین ذرات ماسه دانست. از طرف دیگر بالاتر بودن وزن دانه‌های جامد سیمان (G_S) نسبت به ماسه نیز مزید بر علت است. این درحالی است که با افزایش درصدهای مختلف جایگزینی زئولیت مقدار تراکم نمونه‌ها کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند پایین بودن وزن مخصوص دانه‌های زئولیت نسبت به سیمان و ماسه باشد. چرا که براساس نتایج آزمایش تعیین چگالی ویژه (G_S) انجام شده در این تحقیق، پارامتر(G_S) در زئولیت ۲/۲۲، ماسه ۲/۷۱ و سیمان ۳/۱۱ بوده است. این در حالی است که درصد رطوبت بهینه در تمامی طرح اختلاط‌ها تقریباً ثابت و برابر ١٤٪ می‌باشد.

سیمان در مقایسه با زئولیت دارای مسائل زیست‌محیطی و مسائل دیگری از جمله زمان اختلاط باتوجه به گیرش سیمان و مشکل شدن عمل تراکم از کارایی کمتری برخوردار است. هم‌چنین درصدهای کاهشی ناشی از استفاده از زئولیت به‌جای سیمان درمقابل اثرات زیست‌محیطی و ارزان بودن زئولیت نسبت به سیمان (حداقل نصف قیمت سیمان) قابل صرف نظر کردن است.

زئولیت علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و ذخیره کردن مقدار قابل توجهی انرژی در فرآیند تولید سیمان و مشارکت در توسعهٔ پایدار، از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای خصوصاً Co_2 تأثیرگذار است؛ لذا برای تثبیت بسترهای ماسه‌ای و خاکریزهای ماسه‌ای استفاده از زئولیت به‌جای سیمان پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق زئولیت به‌عنوان یک مادهٔ معدنی پوزلانی

برای کاهش معضلات زیست‌محیطی سیمان در ماسهٔ سیمانی معرفی شده است. در بررسی نتایج آزمون تراکم استاندارد بر روی نمونه‌های زئولیتی سیمانی مشاهده می‌شود:

۱. حداکثر وزن مخصوص خشک با افزایش درصد سیمان افزایش می‌یابد.
۲. حداکثر وزن مخصوص خشک با افزایش درصد جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان کاهش می‌یابد.
۳. درصد رطوبت بهینه برای تمامی حالات درنظر گرفته‌شده تقریباً ۱٤ درصد است.
٤. کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک ناشی از استفاده از زئولیت به‌جای سیمان بین ۲ تا ۲/۵ درصد است.
۵. مدل چندجمله‌ای ارائه‌شده در این مقاله تخمین مناسبی از حداکثر وزن مخصوص برای نمونه‌های زئولیتی سیمانی و سیمانی را دارد.
٦. سیمان درمقایسه با زئولیت دارای مسائل زیست‌محیطی و مسائل دیگری ازجمله زمان اختلاط با توجه به گیرش سیمان و سخت شدن عمل تراکم از کارایی کمتری برخوردار است. هم‌چنین درصدهای کاهشی حداکثر ۲/۵ درصد ناشی از استفاده از زئولیت به‌جای سیمان و باتوجه به کاهش معضلات زیست‌محیطی استفاده از زئولیت به‌جای سیمان ضروری به‌نظر می‌رسد.

مراجع

1. Gunaratne, M., "The Foundation Engineering Handbook", Taylor & Francis Group, CRC PRESS, (2006).
2. Yılmaz, B., Ucar, A., Oteyaka, B., Uz, V., "Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement", *Building and Environment*, Vol 42, pp. 3808–3815, (2007).
۳. خلقی، م.ح، "زئولیت‌ها در ایران"، سازمان زمین‌شناسی کشور، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۱۱۲، (۱۳٦۹).
4. Mola-Abasi H, Shooshpasha I, "Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil" *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 8 pp. 746–752, (2016)
5. ACI Committee 230., "State-of-of-the-Art report on soil cement", ACI. 230.1R-90. American Concrete Institute, *Farmington Hills, Michigan*, pp. 1-23, (1997).
6. Kayaو, A., Durukan, S., "Utilization of Bentonite-Embedded Zeolite as Clay Liner", *Applied Clay Science*, Vol. (25), pp. 83– 91,(2004).
7. White,W. G., and Gnanendran, C. T., "The Influence of Compaction Method and Density on the Strength and Modulus of Cementitiously Stabilized Pavement Material", *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. (6), No. (2), pp. 97-110, (2005).
8. Zabielska-Adamska, K., "Laboratory compaction of fly ash and fly ash with cement additions", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. (151), pp. 481–489, (2008).
9. Al-Aghbari, M. Y., Mohamedzein, Y. E. A., Taha, R., "Stabilization of Desert Sands Using Cement and Cement Dust", *Proceeding of the Institution of Civil Engineers*, Ground Improvement Vol. (162), pp. 145-151, (2009).

10. Vogiatzis, D., Kantiranis, N., Filippidis, A., Tzamos, E., and Sikalidis, C., "Hellenic Natural Zeolite as a Replacement of Sand in Mortar: Mineralogy Monitoring and Evaluation of Its Influence on Mechanical Properties", *Geosciences*, Vol, 2, pp. 298-307, (2012).
11. Hong S., "Geotechnical laboratory characterization of sand zeolite mixtures", Master Thesis, Maysia University, (2015).
12. Yilmaz, E., Belem, T., & Benzaazoua, M., "Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions", *Engineering Geology*, Vol. 185, pp. 52-62. (2015).
13. Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012) .
14. Annual Book of ASTM Standards., "Standard Test Me thods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken,(2012).
15. Annual Book of ASTM Standards., "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken,(2012).
16. Annual Book of ASTM Standards., "Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", American Society for Testing and Materials, West Conshohock,(2012*).*
۱۷. نورزاد، رضا، "مشخصات رفتاری ماسهٔ مسلح با ژئوتکستایل"، پایان‌نامهٔ دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۹).
18. Annual Book of ASTM Standards., "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil", American Society for Testing and Materials, West Conshohocke, (2012).